УДК 544.45, 621.039

ИНЖЕНЕРНЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ СКОРОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАСПЛАВА, СОДЕРЖАЩЕГО ЦИРКОНИЙ И УРАН, С ЖЕРТВЕННЫМ МАТЕРИАЛОМ УСТРОЙСТВ ЛОКАЛИЗАЦИИ

Сулацкий А.А.

"Научно-исследовательский технологический институт им. А.П. Александрова, Сосновый Бор, Россия

АННОТАЦИЯ

Целью работы является разработка пригодных к применению в инженерных расчётах безитерационных формул по скорости взаимодействия расплава, содержащего неокисленные цирконий и уран, с имеющим значительный окислительный потенциал жертвенным материалом.

Методы работы состоят в теоретическом анализе разработанной ранее математической модели взаимодействия расплава, содержащего цирконий и уран, с твёрдым жертвенным материалом, содержащим эффективный окислитель, в режиме жидкофазного горения.

Результаты работы. Получены инженерные безитерационные формулы для расчёта температуры фронта горения и скорости движения фронта горения при взаимодействии расплава с жертвенным материалом. Формулы пригодны для описания взаимодействия жертвенного материала с расплавом как субокисленного кориума (т.е. оксидного, содержащего неокисленный цирконий), так и металлического, содержащего неокисленные цирконий и уран. Формулы получены как для случая суммарно экзотермического взаимодействия расплава с жертвенным материалом, так и для случая суммарно эндотермического взаимодействия. Ограничением формул является их применимость только для расплава, не имеющего собственного внутреннего тепловыделения.

Научная новизна. Впервые получены инженерные соотношения, описывающие процесс жидкофазного горения, имеющего место при взаимодействии расплава, содержащего цирконий и уран, с имеющим значительный окислительный потенциал жертвенным материалом.

Практическая значимость. Разработанные формулы позволяют безитерационным способом определить в оценочных расчётах скорость взаимодействия (абляции) жертвенного материала при взаимодействии с расплавом, содержащим цирконий и уран.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из защитных барьеров на пути распространения радиоактивных материалов во внешнюю среду при тяжелой аварии на АЭС являтся внекорпусное устройство локализации расплава (УЛР), называемое также "ловушкой расплава". Для российских АЭС нового поколения разработана ловушка тигельного типа [1], поступая в которую расплав кориума локализуется в полости, имеющей внешнее водяное охлаждение и частично заполненной так называемым жертвенным материалом (ЖМ).

Расплав кориума, поступающий в УЛР, состоит из двух жидкостей: оксидной и металлической, причём оксидная жидкость содержит оксиды урана, циркония и неокисленный цирконий (т.е. фактически является субокисленной), а металлическая жидкость за счёт перераспределения компонентов между двумя жидкостями помимо компонентов стали содержит также цирконий и уран. Свободные Zr и U расплава кориума являются активными восстановителями и для снижения выхода водорода необходимо предотвратить их взаимодействие с водой или паром.

Другим важным фактором, негативно влияющим на работоспособность УЛР, является

© Сулацкий А.А.

высокая температура поступающего кориума. Так, в соответствии с различными сценариями тяжёлой аварии начальная температура оксидной составляющей расплава кориума в УЛР может достигать величины 2700…3000°С.

ЖМ предназначен для снижения температуры расплава кориума в УЛР и увеличения поверхности охлаждения расплава. Дополнительными назначениями ЖМ являются окисление содержащихся в расплаве свободных циркония и урана, снижение плотности оксидного расплава и предотвращение возникновения вторичной критичности расплава.

В состав ЖМ входят как стальная, так и оксидная части. Причём, в оксидном ЖМ должен содержаться компонент с высоким окислительным ресурсом. В данной работе рассматривается только оксидный ЖМ.

По результатам исследований [1] для УЛР новых проектов российских АЭС был рекомендован ЖМ с составом, близким к эквимолярному составу смеси оксидов Fe_2O_3 (65–70 масс.%) и Al_2O_3 (30–35 масс.%). Близкое к указанному содержание Fe_2O_3 имеет и ЖМ для УЛР нового проекта АЭС Ëu-APR1400, южнокорейской разработки [2].

Для расчетного моделирования процессов в ловушке и обоснования её эффективности необходимо знание кинетики и механизма взаимодействия расплава кориума с ЖМ. Кинетика взаимодействия ЖМ с расплавом кориума зависит от того, с каким компонентом расплава контактирует ЖМ: с расплавом металлов, с полностью окисленным или с субокисленным расплавом кориума. Неокисленные Zr и U, содержащиеся в расплаве, обусловливают экзотермические окислительно-восстановительные химические реакции с оксидами железа, содержащимися в ЖМ. В [3] предложена модель взаимодействия ЖМ с субокисленным расплавом, основанная на механизме **жидкофазного горения** (ЖФГ). В [4] была предложена универсальная модель взаимодействия ЖМ как с субокисленным расплавом, так и с металлическим расплавом, содержащим неокисленные Zr и U. Модель [4] представляет собой систему нелинейных уравнений, вполне пригодную для численного решения в расчётных кодах, однако неудобную для оценочных инженерных расчётов. Данная работа посвящена разработке инженерых формул, позволяющих оценить скорость взаимодействия ЖМ с расплавом, содержащим неокисленные Zr и U, в режиме ЖФГ. Предложенные формулы имеют безразмерный вид, позволяющий описать процесс в удобной достаточно компактной форме.

СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ ЖФГ

Достаточно подробное описание математической модели ЖФГ приведено в более ранних работах [3, 4]. Модель разработана в безразмерной форме, в которой приняты следующие безразмерные обозначения:

$$x = \frac{\sum_i r_{x,i} - r_{ЖМ} - c_{ЖМ}\Delta T_p}{\Delta T_p \cdot \left(c_{ЖМ} + \sum_k {}^{(p)}c_k \gamma_k \right)} \qquad (1)$$

– безразмерный суммарный тепловой эффект химических реакций в ФГ за вычетом затрат тепла на разложение/расплавление и подогрев компонентов ЖМ от температуры внешней среды до температуры расплава (T_p), где $\sum_i r_{x,i}$ – суммарный тепловой эффект всех окислительно-восстановительных реакций, имеющих место в ФГ, на единицу массы ЖМ, $r_{ЖМ}$ – затраты тепла на единицу массы ЖМ, потребные для подогрева ЖМ от температуры внешней среды до температуры T_* и на разложение/расплавление ЖМ, $c_{ЖМ}$ – удельная теплоёмкость ЖМ, $\Delta T_p = T_p - T_*$ – перепад между температурой расплава (T_p) и интерфейсом ЖМ/расплав (T_*), $\sum_k {}^{(p)}c_k \gamma_k$ – суммарная теплоёмкость восстановителей (цирконий и уран), количество которых находится в стехиометрическом соотношении с восстановителями ЖМ и в соотношении друг с другом, задаваемым актуальным составом расплава, c_k – удельные теплоёмкости восстановителей, γ_k – стехиометрические коэффициенты восстановителей. Все параметры, входящие в (1) известны, поэтому безразмерная переменная x является аргументом системы. При $x < 0$ имеем случай ЖФГ с суммарным эндотермическим эффектом, $x > 0$ соответствует случаю ЖФГ с суммарным экзотермическим эффектом;

$$a_1 = \left(\frac{\alpha^{(*)}_{ЖМ/р}}{\alpha^{(*)}_{ФГ}} \right)$$

– соотношение коэффициента теплообмена между ЖМ и расплавом, рассчитанного для случая отсутствия ФГ, и коэффициента теплообмена между ЖМ и ФГ, рассчитанно-

го в предположении равенства температур ФГ и расплава. Данную безразмерную величину можно определить расчётом. Причём для каждого варианта состояния расплава и геометрии поверхности ЖМ эта величина меняется слабо и поэтому её можно считать параметром процесса. В случае субокисленного расплава имеет место $a_1 < 1$, а для металлического расплава $a_1 > 1$;

$$a_2 = \frac{r_{ЖМ}}{\Delta T_р \cdot \left(c_{ЖМ} + \sum_k^{(p)} c_k \gamma_k \right)}$$

– безразмерная переменная, представляющего собой соотношение затрат тепла на подогрев ЖМ от температуры внешней среды до температуры T_*, на разложение/расплавление ЖМ и затрат тепла на подогрев веществ, поступающих в ФГ, от температуры T_* до температуры расплава. Эту переменную также можно считать параметром процесса;

m – ещё один безразмерный параметр процесса, предсталяющий собой знаменатель показателя степени в зависимости коэффициента теплообмена между ЖМ и расплавом от температуры, рассчитанного для случая отсутствия ФГ:

$$\alpha_{и/р} = \alpha^{(*)}_{ЖМ/р} \cdot \left| \frac{T_и - T_р}{T_р - T_*} \right|^{1/m},$$

где $T_и$ – температура интерфейса между расплавом и ФГ. Приведём две характерные (наиболее частые) величины этого параметра: $m = 3$ – для свободной турбулентной конвекции жидкости без внутреннего тепловыделения и $m \to +\infty$ – для свободной турбулентной конвекции жидкости, имеющей внутреннее тепловыделение.

Определяемыми переменными процесса являются следующие переменные:

$$y = \frac{T_и - T_*}{T_р - T_*} = \frac{\Delta T_и}{\Delta T_р}$$

– безразмерная температура интерфейса между расплавом и ФГ;

$$Y = \frac{T_{ФГ} - T_*}{T_р - T_*} = \frac{\Delta T_{ФГ}}{\Delta T_р}$$

– безразмерная температура ФГ;

$$\omega = \frac{\left(c_{ЖМ} + \sum_k^{(p)} c_k \gamma_k \right) \cdot \rho_{ЖМ} W}{\alpha^{(*)}_{ЖМ/р}}$$

– безразмерная скорость абляции ЖМ, где W – размерная скорость абляции ЖМ, $\rho_{ЖМ}$ – плотность ЖМ.

Уравнения, связывающие междё собой эти 3 неизвестные с аргументом и тремя параметрами, имеют вид (см. [3, 4]):

$$x = Y - 1 + a_1 a_2 \cdot \frac{|y-1|^{\frac{m+1}{4m}}}{|y-1|^{\frac{m-3}{4m}} + a_1^{3/4}} \cdot \frac{(Y-1)}{Y^{4/3}} \qquad (2)$$

$$Y = y + a_1^{3/4} \cdot \mathrm{sign}(y-1) \cdot |y-1|^{\frac{3(m+1)}{4m}} \qquad (3)$$

$$\omega = \frac{Y^{4/3}}{a_1 a_2} \qquad (4)$$

С физической точки зрения уравнения (2)÷(4) представляют собой уравнения баланса массы на интерфейсах расплав-ФГ и ФГ-ЖМ, а с математической точки зрения – систему трёх нелинейных алгебраических уравнений относительно трёх неизвестных: $\{y, Y, \omega\}$. Причём понятно, что связи $y = y_{a_1,a_2,m}(x)$, $Y = Y_{a_1,a_2,m}(x)$ и $\omega = \omega_{a_1,a_2,m}(x)$ выражены в этих уравнениях в неявной форме.

С одной стороны, решение этой системы уравнений в рамках расчётных кодов не представляет особых сложностей. В частности, в коде CORCAT [5] с успехом применён простой метод половинного деления.

Однако, необходимо помнить, что при этом существует сложность, связанная с возможным наличием области многозначности решения при $m > 3$ (см. [3, 4]). В этом случае необходимо либо учитывать предысторию процесса (что может приводить к гистерезисным явлениям в нестационарных условиях), либо предпринимать искусственные меры для предотвращения попадания расчётов в область многозначности.

С другой стороны, система (2)÷(4) очень неудобна для оценочных инженерных (“ручных”) расчётов. Поэтому желательно иметь приближённое явное решение $Y = Y_{a_1,a_2,m}(x)$. При этом, зная Y, с использованием уравнения (4) безразмерная скорость абляции ω определяется уже безитерационно, а значение y – безразмерной температуры на интерфейсе расплава и ФГ не представляет особого самостоятельного интереса.

Для достаточно важного случая $m = 3$ возможно существенное упрощение системы. При этом уравнение (4) не изменится никак, а уравнения (2) и (3) примут вид:

$$x = Y - 1 + \frac{a_1 a_2}{1 + a_1^{3/4}} \cdot |y - 1|^{1/3} \cdot \frac{(Y-1)}{Y^{4/3}}, \quad (5)$$

$$Y = \left(1 + a_1^{3/4}\right) \cdot y - a_1^{3/4},$$

соответственно. Видно, что связь переменных y и Y (3) стала линейной и можно выразить y через Y следующим образом:

$$(y-1) = \frac{Y-1}{1 + a_1^{3/4}} \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5) получается следующая связь x и Y:

$$x = Y - 1 + a_3 \cdot |Y-1|^{1/3} \cdot \frac{(Y-1)}{Y^{4/3}} \quad (7)$$

В уравнении (14) для упрощения введёно новое обозначение:

$$a_3 = \frac{a_1 a_2}{\left(1 + a_1^{3/4}\right)^{4/3}}$$

Функциональная связь $Y = Y_{a_3}(x)$ попрежнему является неявной. Но она уже всего однопараметрическая и связывает всего 2 переменные, а не 3, как в случае системы уравнений (2) и (3).

Остальные независимые переменные и параметры процесса не являются заведомо известными величинами: ни малыми, ни большими. Так, для условий экспериментов по взаимодействию расплава с ЖМ [6] значение параметра a_1 находилось в интервале от 0,6 до 0,7 в случае субокисленного расплава и в интервале от 1,9 до 7,2 в случае металлического расплава. Величина параметра a_2 была больше единицы в обоих случах и находилась в интервале от 1,5 до 3,5. Это соответсвует диапазону изменения параметра a_3 от 0,47 до 2,55. Независимая переменная (аргумент) x варьировался в более широких пределах: от 0,05 до 0,87. И, в принципе, в зависимости от состава ЖМ и параметров расплава переменная x может принимать и отрицательные значения, и значения существенно больше 1.

Представляется удобным рассмотреть отдельно случаи суммарно экзотермического ($x > 0$) и суммарно эндотермического ($x < 0$) ЖФГ.

СУММАРНО ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ЖФГ

Легко доказать, что в случае $x > 0$ имеет место $y > 1$ и $Y > 1$. Тогда из (7) можно получить следующую связь x и Y:

$$x = Y - 1 + a_3 \cdot \left(\frac{Y-1}{Y}\right)^{4/3} \quad (8)$$

Пропуская элементарные, хотя и трудоёмкие преобразования, связанные с нахождением пределов, разложением в ряды и поиском подходящих интерполяций, сразу приведём итоговую формулу для случая $x > 0$:

$$Y \approx 1 + \left[Z_1^n + Z_2^n\right]^{1/n}, \quad (9)$$

где приняты следующие обозначения:

$$Z_1 = \frac{-1 + x + a_3 + \sqrt{(1 + x + a_3)^2 + 4a_3}}{2} \quad (10)$$

$$Z_2 = \frac{1}{2} \cdot x^{\frac{3}{4} + \frac{1}{4S}} \quad (11)$$

$$S = \sqrt{1 + 0{,}396854 \cdot a_3^{4/3}} \quad (12)$$

$$n = \sqrt{\frac{100}{a_3^2} + \frac{49}{25}} \quad (13)$$

Необходимо сразу сказать, что приближённое решение (9)÷(13) имеет правильные (т.е. совпадающими с предельными решениями уравнения (8)) пределы при $x \to +0$ и $x \to +\infty$.

Сравнение приближённого решения (9)÷(13) с численным решением уравнения (8) было произведено в дипазоне изменения переменной x: от 0,01 до 1000 и параметра a_3: от 0,01 до 100. Оба эти диапазона существенно перекрывают область разумных значений этих переменных/параметров. Максимальное относительное отклонение (в сторону завышения по сравнению с точным значением), равное ≈12%, имело место при наибольшем исследованном значении a_3, равном 100, и при $x \approx 80$. Надо сказать, что эти значения x и a_3 чрезвычайно велики (особенно по сравнению со значениями, имевшими место в условиях экспериментов [6]). В целом относительная погрешность имела знакопеременный характер и убывала по модулю как со стремлением x к нулю, так и при стремлении x к $+\infty$, а в экспериментальном диапазоне x и a_3 она не превышала ±2%.

СУММАРНО ЭНДОТЕРМИЧЕСКОЕ ЖФГ

В случае $x < 0$ имеет место $y < 1$ и $Y < 1$. Тогда из (7) можно получить следующую связь x и Y:

$$x = Y - 1 - a_3 \cdot \left(\frac{1-Y}{Y}\right)^{4/3} \quad (14)$$

Снова пропуская рутинные выкладки, сразу приведём итоговую формулу для случая $x < 0$:

$$Y \approx 1 - \left[z_1^k + z_2^k \right]^{1/k}, \quad (15)$$

где приняты следующие обозначения:

$$z_1 = \frac{(-x)^{3/4}}{a_3^{3/4} + (-x)^{3/4}} \quad (16)$$

$$z_2 = \frac{(-x)^{\frac{3}{4} + \frac{1}{4s}}}{\left(1 + a_3\right)^{3/4}} \quad (17)$$

$$s = \left(1 + 0{,}75 \cdot a_3\right)^{0,7} \quad (18)$$

$$k = -0{,}791 \cdot a_3^{-0,4} - 1{,}562 \cdot a_3^{+0,4} \quad (19)$$

Приближённое решение (15)÷(19) имеет правильные (т.е. совпадающими с предельными решениями уравнения (14)) пределы при $x \to -0$ и $x \to -\infty$.

Сравнение приближённого решения (15)÷(19) с численным решением уравнения (14) было произведено в дипазоне изменения переменной x: от 0,01 до 1000 и параметра a_3: от 0,01 до 100. Оба эти диапазона существенно перекрывают область разумных значений этих переменных/параметров. Максимальное относительное отклонение (в сторону завышения по сравнению с точным значением), равное ≈24%, имело место при наименьшем исследованном значении a_3, равном 0,01, и при x в интервале от –3 до –2. Надо сказать, что это значение параметра a_3, само по себе чрезвычайно мало (особенно по сравнению со значениями, имевшими место в условиях экспериментов [6]), а значения Y, получающиеся при этих значениях переменной x и параметра a_3 равны и ≈0,01. Что соответствует ничтожным перегревам ФГ относительно температуры разложения/расплавления ЖМ (T_*). При этом само возникновение ЖФГ представляется несколько проблематичным. В целом относительная погрешность имела знакопеременный характер и убывала по модулю как со стремлением x к нулю, так и при стремлении x к $-\infty$.

ВЫВОДЫ

- Получены инженерные безитерационные формулы для расчёта температуры фронта горения и скорости движения фронта горения при взаимодействии жертвенного материала и расплава, содержащего цирконий и уран;
- Формулы пригодны для описания взаимодействия жертвенного материала с расплавом как субокисленного расплава (т.е. оксидного, содержащего неокисленный цирконий), так и металлического, содержащего неокисленные цирконий и уран;
- Формулы получены как для случая суммарно экзотермического взаимодействия расплава с жертвенным материалом, так и для случая суммарно эндотермического взаимодействия;
- Формулы разработаны с использованием безразмерных переменных, характеризующих процесс и упрощающих уравнения;
- Ограничением формул является их применимость только для расплава, не имеющего собственного внутреннего тепловыделения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Asmolov V.G., Bechta S.V., Berkovich V.M. et al. VVER-1000 Reactor Core Melt Catcher of Cold Crucible Type // Procideengs of International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP 05), May 15-19, 2005 – Seoul, Korea – Paper 5238.
2. Granovsky V.S, Sulatsky A.A., Khabensky V.B. et al. Modeling of Melt Retention in EU-APR1400 Ex-Vessel Core Catcher // Procideengs of International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP 12), June 24-28, 2012 – Chicago, USA – Paper 12348.
3. Сулацкий А.А. Математическая модель жидкофазного горения циркония // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. Сборник науч-

ных статей. НПВК “Триакон”: №2(10), 2012, С.3-9.

Sulatskiy A.A. Mathematical model of zirconium liquid-phase burning // Modern science: researches, ideas, results, technologies. Collection of research papers. NPVC “Triacon”: #2(10), 2012, P.3-9.

4. Сулацкий А.А. Математическая модель взаимодействия расплава кориума, содержащего цирконий и уран, с жертвенным материалом устройств локализации // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. Сборник научных статей. НПВК “Триакон”: №1(12), 2013, С.55-61.

Sulatskiy A.A. Mathematical model of the interaction between corium melt, containing zirconium and uranium, and sacrificial material of the core catcher // Modern science: researches, ideas, results, technologies. Collection of research papers. NPVC “Triacon”: #1(12), 2013, P.55-61.)

5. Бешта С.В., Витоль. С.А., Грановский В.С. и др. Формирование ванны расплава активной зоны ядерного реактора в ловушке тигельного типа для АЭС с ВВЭР // Теплоэнергетика, 2011, 5, С.61-65.

Beshta S.V., Vitol S.A., Granovskiy V.S. et al. Formation of molten pool into crucible type core catcher for NPP with WWER // Thermal Engineering, 2011, 5, P.61-65.

6. Бешта С.В., Хабенский В.Б., Грановский В.С. и др. Взаимодействие оксидного жертвенного материала устройства локализации с расплавом кориума при тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР // Труды 5-й Российской национальной конференции по теплообмены, Россия, Москва, 25-29 октября, 2010, Т.1.

Beshta S.V., Khabenskiy V.B., Granivskiy V.S. et al. Interaction between oxidic sacrificial material of core catcher and molten corium in severe accident of NPP with WWER // Proceedings of the 5-th Russian Conference on Heat Transfer, Russia, Moscow, October 25-29, 2010, V.1.